智能制造研究热点及趋势分析

闫纪红*, 李柏林

哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001

* 联系人, E-mail: jyan@hit.edu.cn

2019-02-16 收稿, 2019-08-30 修回, 2019-09-04 接受, 2020-02-26 网络版发表
国家自然科学基金(51561125002)和国家重点研发计划(2018YFB1306003)资助

摘要 随着人工智能和信息科学技术在制造业的广泛应用, 全球越来越多的科研学者将研究方向聚焦于智能制造领域. 以Web of Science核心合集数据库1987~2017年收录的1370篇智能制造领域的研究文献为对象, 利用VOSviewer分析工具, 给出了智能制造的3个发展阶段, 对智能制造领域研究的发展状况、相关国家的发文数量、研究热点技术以及趋势变化进行了分析. 结果表明: 智能制造在2013年后进入了飞速发展时期; 智能制造的发展内涵主要经历了从数字化到网络化再到智能化的过程; 智能制造中新兴的热点技术有云计算、大数据、物联网和信息物理系统(CPS)等. 本文将为我国科研学者在今后智能制造领域的研究提供参考.

关键词 工业4.0, 中国制造2025, 智能制造, 研究热点, VOSviewer

智能制造的概念于20世纪80年代末正式提出^[1], 随着计算机、人工智能、互联网技术的不断发展和在制造业中的应用, 智能制造受到世界各国越来越多的关注. 各个国家也都推出一系列的智能制造支持政策和发展计划, 如欧盟的7个研发框架计划^[2]和德国的工业4.0战略计划^[3]、美国的国家科学基金智能制造项目和先进制造业国家战略计划^[4]、日本的智能制造研究10年计划和机器人新战略^[5]、韩国的高级先进技术国家计划和制造业创新3.0战略^[6]等. 我国早在1991年即开启了智能制造领域的研究, 国家自然科学基金设立了重大项目“智能制造系统关键技术”^[7], 特别是在德国提出工业4.0后, 我国政府相继提出了两化深度融合、互联网+、中国制造2025等一系列行动计划^[8], 用以指导中国智能制造的发展.

智能制造是制造业的发展方向, 也是中国制造2025的主攻方向. 经过近30年的发展, 智能制造的研究涵盖了产品设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节^[9], 但还没有对智能制造领域研究阶段进行回顾

及研究热点可视化分析的相关成果. 为更好地了解全球智能制造领域的发展状况, 客观反映相关国家/地区在该领域的科学贡献以及为研究学者今后在智能制造中的研究提供参考和借鉴, 本文基于Web of Science核心合集数据库检索到的智能制造领域研究文献, 利用VOSviewer分析工具, 全面回顾和分析了30余年来智能制造领域的研究状况、热点技术以及智能制造的发展内涵.

1 数据来源和研究方法

以美国Thomson Scientific(汤姆森科技信息集团)基于WEB开发的Web of Science数据库为数据来源. 该数据库所收录的文献覆盖了全世界最重要和最有影响力的研究成果, 已成为国际公认的进行科学统计与科学评价的主要检索工具(https://en.wikipedia.org/wiki/Web_of_Science). 在其核心合集上检索与智能制造相关的文献, 按时间排序得到第一篇文献发表于1987年, 设置检索时间跨度为1987~2017年, 共检索得到1370篇

引用格式: 闫纪红, 李柏林. 智能制造研究热点及趋势分析. 科学通报, 2020, 65: 684-694

Yan J H, Li B L. Research hotspots and tendency of intelligent manufacturing (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 684-694, doi: [10.1360/N972019-00125](https://doi.org/10.1360/N972019-00125)

文献。

VOSviewer是荷兰莱顿大学van Eck等人^[10]基于VOS可视化技术,专门开发的一款分析文献知识单元的可视化工具。其突出的优点是图形展示能力强,非常适合分析大规模样本数据。根据在Web of Science数据库中的检索结果,对智能制造领域各年的发文数量及各个国家/地区的发文数量进行统计;运用VOSviewer分析软件,得到题目和关键词的密度视图,同时统计高频术语,两者结合分析1987~2017年智能制造研究的发展状况、主导国家以及热点技术等。

2 智能制造发展历程及热点技术

2.1 智能制造发展阶段划分

对检索到的1987~2017年各年的发文数量进行统计分析,并计算各年文献数量较上一年文献数量的增长率,如图1所示。

图1中的两条折线分别代表1987~2017年各年文献数量和相对增长率的变化情况。综合上图中的绝对发文量和相对增长率来分析智能制造研究的发展阶段。虽然1989年的文献增长率高达275%,但其绝对发文数量较少,可以看到1987~1997年间文献发表数量相对较少且增长率波动范围较大。根据普赖斯(Price)文献增长理论中关于兴起阶段的描述:某领域的研究刚刚兴起,论文发表数量较少且增长不稳定^[11]。得出1987~1997年符合其描述,将1987~1997年划分为智能制造的初期发展阶段。1998~2012年间文献的数量相对稳定且增长率

在一定范围内呈正负平稳波动,将1998~2012年划分为智能制造的平稳发展阶段。2013~2017年文献数量呈快速上升趋势,虽然2016年的文献数量增长率有小幅回落,但此阶段计算增长率的基数较大,增长率较上一阶段仍有明显的提升,特别是图1中的2015和2017年两个节点,将2013~2017年划分为智能制造的快速发展阶段。这也与2013年德国正式提出的“工业4.0”战略、2014年美国正式成立的“工业互联网”联盟和2015年“中国制造2025”行动计划的正式提出相契合,此阶段智能制造的发展进入了黄金发展时期。下面将详细论述智能制造3个发展阶段的研究热点等内容。

2.2 1987~1997年智能制造热点技术

2.2.1 研究热点分析

文章标题和关键词中的术语能有效反映文章的研究主题和内容,利用VOSviewer软件绘制此阶段题目和关键词中术语的密度视图如图2所示。在密度视图中,系统提供3种颜色分布,红色区域术语出现的频次较高,绿色区域的术语出现的频次较低,可以直观地看到密度视图中重要的区域;术语空间的距离分布表示他们的相似度,即两个术语共同出现的次数与各自出现次数乘积的比值。

可以看出“intelligent manufacturing”和“intelligent manufacturing system”两个术语在密度视图中呈现红色,这两个词出现的频次较高。本文结合在Web of Science核心合集中检索到的被引频次较高的文献内容,侧重从题目和关键词中表征研究问题和技术方法

图1 (网络版彩色)1987~2017年各年文献数量和相对增长率

Figure 1 (Color online) Number of documents and growth rates for each year from 1987 to 2017

图 2 1987–1997 年文献题目和关键词术语密度视图。(a) 题目术语; (b) 关键词术语
Figure 2 1987–1997 term density view of document titles and keywords. (a) Title; (b) keyword

的高频术语来阐明智能制造领域不同阶段的研究热点,并从中分析其发展历程。

由图2看出,除“intelligent manufacturing”和“intelligent manufacturing system”外,“flexible manufacturing system”,“intelligent control”,“neural networks”和“expert systems”也相对较为突出,此阶段文献题目和关键词中前10位的高频术语见表1所示。

综合图2、3和表1可以看出,此阶段主要研究内容为智能调度和智能控制问题等,主要的研究热点为专家系统和神经网络等人工智能技术^[12]在柔性制造和计算机集成制造中的应用。在专家系统方面,Shi等人^[13]提出了一种应用专家系统解决柔性制造系统中智能调度和控制的方法,结合分析程序和仿真方法联合获得最佳调度结果;Cesarone^[14]提出了一种过程质量控制

和判断的方法,利用专家系统将质量评估过程整合到生产过程中,使工厂进一步实现了自动化和计算机集成;Bayliss等人^[15]描述了德蒙福特大学在专家系统和计算机辅助系统设计集成方面的工作,并展望其在智能制造系统中的应用。在神经网络算法方面,Sun和Yih^[16]提出了一个基于神经网络的控制系统,以动态地适应不同调度策略的柔性制造单元;Zhang和Huang^[17]综述了神经网络在计算机集成制造中的应用,包括监测和诊断、过程建模和控制、调度和规划等,并描述了未来神经网络和专家系统在智能制造系统中的集成应用。

此阶段智能制造的研究正处于起步阶段,由上述内容可以得到智能制造发展初期是以柔性制造和计算机集成制造为主要内容。而柔性制造和计算机集成制

表 1 1987–1997 年文献题目和关键词中高频术语

Table 1 High-frequency terms in 1987–1997 literature titles and keywords

排序	题目术语	题目术语频次	关键词术语	关键词术语频次
1	Intelligent manufacturing system	36	Intelligent manufacturing	27
2	Intelligent manufacturing	31	Intelligent manufacturing systems	21
3	Intelligent scheduling system	12	Expert systems	14
4	Approach	12	Neural networks	14
5	Flexible manufacturing system	10	Artificial intelligence	10
6	Intelligent control	9	Reliability	6
7	Manufacturing environment	8	Simulation	6
8	Neural network	8	CIM	5
9	Expert system	7	Fuzzy control	5
10	Computer	6	CAD	4

图3 1987~1997年智能制造领域发文数量前10位的国家/地区
Figure 3 Top 10 countries or regions in the field of intelligent manufacturing from 1987 to 1997

造是在数控加工中心、计算机辅助技术^[18,19]等数字化制造过程的基础上实现的,此阶段智能制造的发展主要处于数字化时期。同时随着人工智能技术在制造业的应用和发展,如表1所示的专家系统、神经网络以及模糊控制等,使制造过程中的相关知识能够被获取、存储、表达和推理,推动了智能制造的发展与制造技术的智能化^[20]。人工智能技术与数字化制造的集成应用是实现智能制造的第一步,得到此阶段是制造过程数字化向智能化转型的开始。

2.2.2 发文国家分析

统计此阶段发文数量排名前10位的国家/地区如图3所示。

由图3可以看出,从发文数量角度分析,美国在此阶段的发文数量处于绝对领先地位,达96篇,发文数量占全部发文量的34.04%。在智能制造发展的初期阶段,以美国为主的发达国家率先开展了相关研究,而中国在此阶段的发文数量相对较少,智能制造的研究处于

起步阶段。

2.3 1998~2012年智能制造热点技术

2.3.1 研究热点分析

利用VOSviewer软件绘制此阶段题目和关键词中术语的密度视图如图4所示。

由图4可以看出,除“intelligent manufacturing”和“intelligent manufacturing system”外,“design”,“control”,“agent(s)”,“multi-agent systems”和“manufacturing system”也相对较为突出,此阶段文献题目和关键词中前10位的高频术语见表2所示。

综合图4和表2可以看出,此阶段智能制造的主要研究内容有智能制造系统设计问题、智能制造系统控制问题等,主要应用的热点技术为Agent技术和多Agent系统。Agent的概念源于人工智能领域^[21],是分布式人工智能的主要研究方向之一。Agent技术以其独特的自治性、适应性、进化性^[22]等特点,被众多研究者应用在智能制造领域相关问题的研究上;多Agent系统一般由分布在物理或逻辑位置上的一组Agents组成,通过计算机网络共享资源,共同完成生产制造中的有关任务^[23]。在此阶段,Shen^[24]介绍了基于智能Agents的分布式制造调度控制方法,将制造资源(机器人、操作员等)视为智能Agents,该方法具有快速响应性、灵活性、可伸缩性和鲁棒性等优点。2006年Shen等人^[25]进而综述了Agent系统在智能制造中的应用,如企业集成、企业协作、制造过程规划和调度、制造车间控制等,并讨论了在实现基于agent制造系统中的agent封装、组织、协调、安全与隐私等关键问题;Guo和Zhang^[26]提出了基于多Agent的智能制造系统体系结

图4 1998~2012年文献题目和关键词术语密度视图。(a) 题目术语;(b) 关键词术语
Figure 4 1998–2012 term density view of document titles and keywords. (a) Title; (b) keyword

表2 1998~2012年文献题目和关键词中高频术语

Table 2 High-frequency terms in 1998–2012 literature titles and keywords

排序	题目术语	题目术语频次	关键词术语	关键词术语频次
1	Intelligent manufacturing	64	Intelligent manufacturing systems	87
2	Control	61	Intelligent manufacturing	82
3	Design	60	Multi-agent systems	37
4	Manufacturing system	58	Agents	33
5	Intelligent manufacturing system	48	Neural networks	22
6	Agent	45	Flexible manufacturing systems	19
7	Application	25	Genetic algorithm	17
8	Flexible manufacturing system	25	Artificial intelligence	16
9	Intelligent agent	17	Simulation	13
10	Multi agent	16	Data mining	12

构,所提出的架构由各种资源Agent组成,这些代理能够通过网络相互通信并基于他们的知识做出决策。此外神经网络和遗传算法等人工智能算法在制造业也进一步得到了广泛的应用, Hou等人^[27]提出一种基于神经网络与粗糙集集成的制造过程智能监控与诊断方法,反向传播神经网络准确地分类了质量缺陷; Kruger等人^[28]提出了基于智能代理的智能制造体系结构,集成神经网络和遗传算法来进行学习和决策。

此阶段智能制造中应用的最主要热点技术是Agent和多Agent系统,较上一阶段有明显的不同,由上述内容可以得出Agent技术克服了传统专家系统知识获取困难、学习能力差等缺点。在智能制造的研究中,将物理实体和虚拟信息等与制造系统相关的设备或加工信息抽象成各种Agent,各Agent之间通过有线或无线网络实现相互通信,组成一个闭环的多Agent系统,并集成异构智能算法(神经网络、遗传算法等)来实现学习、决策和反馈。Agent之间的通信是实现多Agent系统最关键的问题^[29],网络是智能制造中应用Agent技术的基础^[30]。随着信息技术和计算机网络技术的发展,制造过程中网络化的趋势愈发明显,智能制造的主要内涵已在数字化的基础上发展到了网络化的阶段,网络化实现了制造资源的快速整合和高效协作^[31],进一步推动了智能制造的发展进程。

2.3.2 发文国家分析

统计此阶段发文数量排名前10位的国家/地区如图5所示。

由图5可以看出,从发文数量角度分析,中国的发文数量已升至第1位,达118篇,占全部发文量的

图5 (网络版彩色)1998~2012年智能制造领域发文数量前10位的国家/地区

Figure 5 (Color online) Top 10 countries or regions in the field of intelligent manufacturing from 1998 to 2012

20.94%,美国的发文数量排在第2位(99篇, 14.60%),依旧是发展智能制造的主导国家之一。在世界范围内智能制造的研究处于平稳波动的时间里,随着经济的快速发展,我国智能制造领域的研究发展在此阶段一直处于稳中上升的趋势。

2.4 2013~2017年智能制造热点技术

2.4.1 研究热点分析

利用VOSviewer软件绘制此阶段题目和关键词中术语的密度视图如图6所示。

由图6可以看出,除“intelligent manufacturing”和“intelligent manufacturing system”外,“industry”, “Industry 4.0”, “model”, “control”, “RFID”以及“cloud”等术语在图中也趋于红色,此阶段文献题目和关键词中前10位的高频术语见表3所示。

综合图6和表3可以看出,此阶段智能制造中主要

图6 2013–2017年文献题目和关键词术语密度视图。(a) 题目术语; (b) 关键词术语
Figure 6 2013–2017 term density view of document titles and keywords. (a) Title; (b) keyword

表3 2013–2017年文献题目和关键词中高频术语

Table 3 High-frequency terms in 2013–2017 literature titles and keywords

排序	题目术语	题目术语频次	关键词术语	关键词术语频次
1	Intelligent manufacturing	48	Intelligent manufacturing	76
2	Industry	31	Intelligent manufacturing systems	46
3	Intelligent manufacturing system	25	Industry 4.0	26
4	Model	22	Cloud manufacturing	13
5	Control	20	Cyber-Physical Systems	11
6	Application	16	Cloud computing	10
7	Framework	15	RFID	10
8	Scheduling	14	Big data	10
9	Cloud	13	Internet of Things	9
10	RFID	10	Smart factory	8

研究内容为智能制造系统建模框架问题、智能制造系统控制与调度问题。

此外, 值得一提的是工业4.0问题也开始兴起, Zhong等人^[32]总结了在工业4.0环境下实现智能制造的关键技术及应用框架; Jania等人^[33]综述了工业4.0管理和运营框架, 将工业4.0中应用的技术和工具划分为9个类别并详细介绍了每个类别的应用状况和作用; Wan等人^[34]在工业4.0背景下, 应用物理信息系统(CPS)、大数据、云计算等技术, 提出了智能制造中用于主动预防性维护的制造业大数据解决方案。此阶段主要应用的热点技术方法包括RFID(radio frequency identification)技术、云技术等。RFID技术可以通过无线电号识别特定目标并读写相关数据, 是实现物联网的基础技术之一^[35], 也是制造业和供应链活动的重要驱动力^[36]。Barenji等人^[37]开发了一个面向智能制造的仿真

测试平台, 用以验证RFID技术可以提升柔性装配线调度和控制性能。RFID技术实现了对制造过程中数据的感知, 而云技术(云计算和云制造)则实现了对数据的存储、计算以及服务化的应用。Guo等人^[38]提出了一种基于RFID技术的智能决策支持系统架构来处理分布式制造环境中的生产监控和调度问题, RFID和云技术被整合用于实时远程捕获和存储生产数据; Zhong等人^[39]提出了一种基于云制造的RFID支持的车间物流大数据可视化方法, 充分利用蕴含大量有价值信息和知识的数据; Wu等人^[40]利用无线传感网络、云计算和机器学习等技术, 提出了一种网络化制造过程监控与预测框架, 以实现机器设备的远程健康状况监测和预测分析; Tao等人^[41]针对云制造模式, 设计并实现了一个基于物联网的五层结构(即资源层、感知层、网络层、服务层和应用层)资源智能感知与访问系统, 以满足个性化定

制需求。

2.4.2 新兴热点技术分析

利用VOSviewer绘制2013~2017年文献关键词中术语出现时间视图如图7所示。术语越趋于蓝色,代表出现时间越早,术语越趋于红色,代表出现时间越晚。由图7可以看出,表3中出现的“cloud manufacturing”, “cloud computing”, “big data”, “Internet of Things”以及“Cyber-Physical Systems”等术语的出现时间均在2015年后,是智能制造中新兴的制造模式和技术方法。相关学者也围绕这些方面展开了研究,如Yan等人^[42]在工业4.0环境下,提出一种应用多源异构工业大数据对机器设备进行预测性维护的解决方案; Lee等人^[43]提出了将CPS应用于预测生产系统,以提高生产效率。这些技术的发展与应用,使智能制造产生了革命性的变化,将制造业中类型多样的海量数据自动转化成可用的信息^[44],有助于实现产品设计过程、制造过程和企业管理及服务的智能化;云制造模式为个性化定制生产服务提供了新的途径^[45]。可以预见,云计算技术、大数据技术、物联网技术以及CPS在智能制造中的融合集成应用和云制造模式是目前和今后智能制造领域研究的热点内容之一。

此阶段随着新一代信息通信技术和人工智能技术的发展,如表3所示的RFID技术、CPS、云计算、云制

造、大数据和物联网技术,此外还有在生产中应用的CPS——信息物理生产系统(CPPS)^[46]、3D打印以及大数据时代衍生出的深度学习算法^[47]等,更进一步推动了智能制造的快速发展。这些技术和算法能够解决设备互联和状态感知,以及制造过程中海量数据信息的传输、存储、计算等问题,并依据处理后的数据自动进行科学决策和反馈控制。这些技术的出现及其在制造业的应用,极大地提高了制造智能化的程度,为打造“智慧工厂”^[48]提供了强有力的技术支持。目前我国已开展了相关智能制造示范项目的研发及实施^[49],应用相关技术已可以实现自感知、自学习、自决策、自执行的生产制造模式。此阶段智能制造的发展已在数字化和网络化的基础上正式迈入了智能化的发展时期。

2.4.3 发文国家分析

统计此阶段发文数量排名前10位的国家/地区如图8所示。

由图8可以看出,从发文数量角度分析,中国在此阶段的发文数量达206篇,占全部发文量的50.24%,发文数量已远超过美国,成为智能制造领域最主要的研究力量。尤其是2015年中国政府正式提出“中国制造2025”后,越来越多的中国研究学者投入到了智能制造领域的研究中,发文数量呈快速上升趋势。结合2013年德国“工业4.0”的提出,得到此阶段智能制造的研究从

图7 2013~2017年关键词术语平均出现年份视图

Figure 7 Terms average year of occurrence from 2013 to 2017

图8 (网络版彩色)2013~2017年智能制造领域发文数量前10位的国家/地区

Figure 8 (Color online) Top 10 countries or regions in the field of intelligent manufacturing from 2013 to 2017

前一阶段的平稳发展时期进入了一个高速发展时期。

2.5 智能制造热点技术趋势变化分析

综合上述3个阶段智能制造中主要应用的不同热点技术可以分析得出,随着硬件技术和软件技术如计算机、传感器、互联网、无线传感网络等的快速发展,智能制造的主要内涵从数字化、柔性化、集成化、网络化逐步趋向智能化。智能制造3个阶段的发展内涵不是相互独立的,而是互有重叠,长期共存的。不同阶段主要应用的人工智能技术反映了智能制造的发展水平。专家系统是最早应用在智能制造中的智能技术^[50],主要由知识库和推理机组成,仅能部分代替或者辅助人在制造过程中的决策作用,缺乏灵活性和鲁棒性;神经网络是以数据为基础的智能技术^[51],能够在一定程度上学习和适应变化,可以在很少人为干预的情况对生产制造过程各类问题进行优化;Agent技术能够通过社交、学习、推理等方法感知和适应制造过程中复杂的动态环境,具有很强的开放性、灵活性、适应性和鲁棒性^[52]。Agent将分布式计算引入到制造生产过程中^[53],通过网络实现多个Agent(仓库Agent、AGV Agent、订单Agent等)之间的通信,共享信息、数据和知识等,进而组成多Agent系统,实现了多个智能单元联合协调运作,协同完成某个任务。随着大数据、云计算、深度学习等新一代人工智能技术和RFID、物联网、CPS等先进制造技术的发展与深度融合应用,将生产制造过程中产生的海量数据信息都能够自动获取、存储和计算。将提取和分析得到的有价值的信息实时地反馈给生产制造系统,实现制造系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化^[54],进一步实现智能化生产。智能制造领域的研究随着时间的推移,

3个阶段应用的主流热点技术的智能化程度也在逐渐提高,目前智能制造已正式迈入了智能化的发展阶段。

机器人、数字化制造、3D打印等技术的重大突破和广泛应用正在重构制造业技术体系;基于信息物理系统(cyber-physical system, CPS)的智能工厂正在引领制造方式向智能化方向发展;云制造、网络众包、异地协同设计、大规模个性化定制、精准供应链、电子商务等网络协同制造模式正在重塑产业价值链体系。全球制造业孕育着制造技术体系、制造模式、产业形态和价值链的巨大变革。智能制造以信息的泛在感知、自动实时处理、智能优化决策为核心,驱动各种制造业业务活动的执行,实现跨企业产品价值网络的横向集成,贯穿企业设备层、控制层、管理层的纵向集成,以及从产品设计开发、生产计划到售后服务的全生命周期集成。从而极大地提升产品创新能力,增强快速响应市场能力,提高生产制造过程的自动化、智能化、柔性化和绿色化水平,促进制造业向产业价值链高端迈进。目前,着力解决基于工业互联网的大数据制造中存在的 key 技术问题,在车间工业物联网构建、制造系统云平台实现和基于云平台的网络协同制造系统集成与管理等大数据制造关键技术方面形成突破,对于实现生产过程透明化、协同化、智能化至关重要。

3 结论

本文结合智能制造领域1987~2017各年的文献数量及其相对增长率,给出了智能制造领域的研究分为1987~1997年起步发展阶段、1998~2012年平稳发展阶段和2013~2017年快速发展阶段的结论。分别对各个阶段的研究状况和研究热点技术进行了分析。从研究结果可以看出,经过30余年的发展,智能制造的研究内涵已逐步从数字化到网络化再转变为智能化,数字化和网络化是发展智能化的基石。且目前智能制造的发展仅处于智能化的初期阶段,一些技术的研究与应用尚未得到普及,仍需科研学者进一步开展深入研究并将成果转换为实际的工业应用。智能制造领域的研究经历了两个快速发展时期,一是智能制造发展的初期阶段,其主导国家有美国、日本、英国等国家;二是2013年后随着“工业4.0”和“中国制造2025”相继提出,智能制造领域的研究进入了全新的发展时期,中国、美国、德国等是此阶段智能制造领域的主要研究力量。从研究热点来看,云制造是智能制造领域研究的新兴热点制造模式;现阶段智能制造领域中应用的热点技

术包括云计算、大数据技术、深度学习算法、物联网技术以及CPS等, 这些技术的融合应用使制造过程变得

更加信息化、智能化、个性化以及绿色化, 也是智能制造领域中未来的研究热点趋势之一。

参考文献

- 1 Wright P K, Bourne D A. Manufacturing Intelligence. New York: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1988
- 2 Amoroso S, Coad A, Grassano N. European R&D networks: A snapshot from the 7th EU Framework Programme. *Econ Innov New Technol*, 2018, 27: 404–419
- 3 Lasi H, Kemper H G, Fettke P, et al. Industry 4.0. *Business Inf Syst Eng*, 2014, 6: 239–242
- 4 Oztemel E. Intelligent manufacturing systems. *Robot Comput Integr Manuf*, 2010, 3: 49–51
- 5 Day C P. Robotics in industry—Their role in intelligent manufacturing. *Engineering*, 2018, 4: 440–445
- 6 Jung H, Jeong B, Kim D W. Foreword: Special issue on flexible automation and intelligent manufacturing. *Ind Eng Manag Syst*, 2018, 17: 165
- 7 Chen M, Liang N M. Smart Manufacturing System and Practices (in Chinese). Beijing: Mechanical Industry Press, 2016. 20–72 [陈明, 梁乃明. 智能制造之路: 数字化工厂. 北京: 机械工业出版社, 2016. 20–72]
- 8 Zhou J. Intelligent Manufacturing—Main Direction of “Made in China 2015” (in Chinese). *China Mech Eng*, 2015, 26: 2273–2275 [周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向. 中国机械工程, 2015, 26: 2273–2275]
- 9 Cardin O, Ounnar F, Thomas A, et al. Future industrial systems: Best practices of the intelligent manufacturing & services systems (IMS 2) French Research Group. *IEEE Trans Ind Inf*, 2016, 13: 704–713
- 10 Eck N J V, Waltman L, Dekker R, et al. A comparison of two techniques for bibliometric mapping: Multidimensional scaling and VOS. *J Am Soc Inf Sci Technol*, 2010, 12: 2405–2416
- 11 Barrios M, Borrego A, Vilagínés A, et al. A bibliometric study of psychological research on tourism. *Scientometrics*, 2008, 77: 453–467
- 12 Huang S H, Zhang H C. Neural-expert hybrid approach for intelligent manufacturing: A survey. *Comput Ind*, 1995, 26: 107–126
- 13 Shi H, Xue J. An intelligent scheduling system for flexible manufacturing cell. *Hum Asp Comput Integr Manuf*, 1992, 3: 721–728
- 14 Cesarone J. QEX: An in-process quality control expert system. *Robot Comput-Integr Manuf*, 1991, 8: 257–264
- 15 Bayliss D C, Akueson R, Parkin R, et al. Concurrent engineering philosophy implemented using computer optimized design. *Proc Inst Mech Eng Part B-J Eng Manuf*, 1995, 209: 193–199
- 16 Sun Y L, Yih Y. An intelligent controller for manufacturing cells. *Int J Prod Res*, 1996, 34: 2353–2373
- 17 Zhang H C, Huang S H. Applications of neural networks in manufacturing: A state-of-the-art survey. *Int J Prod Res*, 1995, 33: 705–728
- 18 Zheng L, Jiang P Y, Qiao L H, et al. Challenges and frontiers of manufacturing systems (in Chinese). *J Mech Eng*, 2010, 46: 124–136 [郑力, 江平宇, 乔立红, 等. 制造系统研究的挑战和前沿. 机械工程学报, 2010, 46: 124–136]
- 19 Shirinzadeh B. Strategies for planning and implementation of flexible fixturing systems in a computer integrated manufacturing environment. *Comput Ind*, 1996, 30: 175–183
- 20 Zhou J J, Yao X F, Liu M, et al. State-of-art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2017, 23: 624–639 [周佳军, 姚锡凡, 刘敏, 等. 几种新兴智能制造模式研究评述. 计算机集成制造系统, 2017, 23: 624–639]
- 21 Shen W, Maturana F, Norrie D H. MetaMorph II: An agent-based architecture for distributed intelligent design and manufacturing. *J Intell Manuf*, 2000, 11: 237–251
- 22 Shin M, Jung M. MANPro: Mobile agent-based negotiation process for distributed intelligent manufacturing. *Int J Prod Res*, 2004, 42: 303–320
- 23 Kaddoum E, Gleizes M P, Picard G. Self-regulation in self-organising multi-agent systems for adaptive and intelligent manufacturing control. Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems. IEEE Computer Society, 2008. 107–116
- 24 Shen W. Distributed manufacturing scheduling using intelligent agents. *Intell Syst IEEE*, 2002, 17: 88–94
- 25 Shen W, Hao Q, Yoon H J, et al. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Adv Eng Inf*, 2006, 20: 415–431
- 26 Guo Q, Zhang M. A novel approach for multi-agent-based intelligent manufacturing system. *Inf Sci*, 2009, 179: 3079–3090
- 27 Hou T H T, Liu W L, Lin L. Intelligent remote monitoring and diagnosis of manufacturing processes using an integrated approach of neural networks and rough sets. *J Intell Manuf*, 2003, 14: 239–253
- 28 Kruger G H, Shih A J, Hattingh D G, et al. Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes. *Adv Eng Inf*, 2011, 25: 783–796
- 29 Ding S, Feng X, Yang J, et al. Research for the communication and cooperation mechanism of multi-agent system. International Conference on Electronic Measurement and Instruments. IEEE, 2007. 755–759
- 30 Goh W T, Zhang Z. An intelligent and adaptive modelling and configuration approach to manufacturing systems control. *J Mater Process Technol*, 2003, 139: 103–109

- 31 Cao H, Qin W, Zhang J, et al. Design and implementation of cooperative platform for multiple devices based on multi-agent system in ubiquitous networking environment. *China Conference on Wireless Sensor Networks*. 2012. 1–13
- 32 Zhong R Y, Xu X, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering*, 2017, 3: 616–630
- 33 Jania S, Magdiel L, Jose A M, et al. Industry 4.0 framework for management and operations: A review. *J Ambient Intell Humaniz Comput*, 2017, 9: 1–13
- 34 Wan J, Tang S, Li D, et al. A manufacturing big data solution for active preventive maintenance. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 2039–2047
- 35 Zhong R Y, Xu C, Chen C, et al. Big data analytics for physical internet-based intelligent manufacturing shop floors. *Int J Prod Res*, 2017, 55: 2610–2621
- 36 Wang K S. Intelligent and integrated RFID (II-RFID) system for improving traceability in manufacturing. *Adv Manuf*, 2014, 2: 106–120
- 37 Barenji A V, Barenji R V, Hashemipour M. Flexible testing platform for employment of RFID-enabled multi-agent system on flexible assembly line. *Adv Eng Softw*, 2016, 91: 1–11
- 38 Guo Z X, Ngai E W T, Yang C, et al. An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment. *Int J Prod Econ*, 2015, 159: 16–28
- 39 Zhong R Y, Lan S, Xu C, et al. Visualization of RFID-enabled shopfloor logistics big data in cloud manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 84: 5–16
- 40 Wu D, Liu S, Zhang L, et al. A fog computing-based framework for process monitoring and prognosis in cyber-manufacturing. *J Manuf Syst*, 2017, 43: 25–34
- 41 Tao F, Zuo Y, Xu L D, et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Trans Ind Inf*, 2014, 10: 1547–1557
- 42 Yan J, Meng Y, Lu L, et al. Industrial big data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes and Applications for Predictive Maintenance. *IEEE Access*, 2017, 10: 23484–23491
- 43 Lee J, Jin C, Bagheri B. Cyber physical systems for predictive production systems. *Prod Eng Res Devel*, 2017, 11: 155–165
- 44 Xu X, Hua Q. Industrial big data analysis in smart factory: Current status and research strategies. *IEEE Access*, 2017, 5: 17543–17551
- 45 Hu Y J, Wu L Z, Zhang L, et al. Review on theory and method of cloud manufacturing service evaluation (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2017, 23: 640–649 [胡艳娟, 武理哲, 张霖, 等. 云制造服务评价理论与方法研究综述. *计算机集成制造系统*, 2017, 23: 640–649]
- 46 Neumeyer S, Exner K, Kind S, et al. Virtual prototyping and validation of Cpps within a new software framework. *Computation*, 2017, 5: 1–13
- 47 Wilamowski B M, Wu B, Korniak J. Big data and deep learning. 2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems. *IEEE*, 2016: 11–16
- 48 Shafiq S I, Velez G, Toro C, et al. Designing intelligent factory: Conceptual framework and empirical validation. *Proc Comput Sci*, 2016, 96: 1801–1808
- 49 Zhou J J, Yao X F. Advanced manufacturing technology and new industrial revolution (in Chinese). *Comput Integr Manuf Syst*, 2015, 21: 1963–1978 [周佳军, 姚锡凡. 先进制造技术与新工业革命. *计算机集成制造系统*, 2015, 21: 1963–1978]
- 50 Wu B P F. The application of expert systems to process control. *J Miner Met Mater Soc*, 1991, 43: 13–16
- 51 Šima J. Neural expert systems. *Neural Netw*, 1995, 8: 261–271
- 52 Colombo A W, Schoop R, Neubert R. An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems. *IEEE Trans Ind Electron*, 2006, 53: 322–337
- 53 Ruiz N, Giret A, Botti V, et al. Agent-supported simulation environment for intelligent manufacturing and warehouse management systems. *Int J Prod Res*, 2011, 49: 1469–1482
- 54 Dworschak B, Zaiser H. Competences for cyber-physical systems in manufacturing—First findings and scenarios. *Procedia CIRP*, 2014, 25: 345–350

Summary for “智能制造研究热点及趋势分析”

Research hotspots and tendency of intelligent manufacturing

Jihong Yan^{*} & Bailin Li*School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*^{*} Corresponding author, E-mail: jyan@hit.edu.cn

During the past few years, many countries have put forward their national manufacturing strategies. Although these strategies are proposed and developed under different backgrounds, their common objective is to achieve intelligent manufacturing, which has the potential to revolutionise manufacturing industry and is being nurtured through national projects such as “Industry 4.0” in Germany, “Made Smarter” in the UK, “Industrial Internet” in the US, and “Intelligent Manufacturing” in China, etc. These projects promote a new manufacturing philosophy to guide the development of industrial manufacturing in a digital, intelligent and networked global environment, as well as upgrade the traditional manufacturing to intelligent manufacturing. With taking advantages of artificial intelligence and advanced manufacturing technologies, intelligent manufacturing connects all manufacturing facilities and enables physical processes and information flows to be available when and where they are needed across holistic manufacturing supply chains, this will benefit optimizing manufacturing resources, improving product quality, system productivity and sustainability, and reducing costs.

Intelligent manufacturing has attracted intense attention due to the broad application of artificial intelligence and information science technology in manufacturing industry. In this study, 1370 papers in intelligent manufacturing are taken as data sources, which are retrieved from the Web of Science Core Collection Database between 1987 to 2017. The present paper aims to reveal the development status, the number of documents by leading countries, hotspots and trends of intelligent manufacturing by VOSviewer tool. Based on annual outputs and growth rate of literatures, the initial development stage (1987–1997), the stable development stage (1998–2012) and the rapid development stage (2013–2017) of intelligent manufacturing are proposed. On the whole, to date, China takes a leading position out of more than 100 countries or regions, followed by America and England. With more than 30 years of evolution, the connotation of intelligent manufacturing mainly goes through the process from digitalization to networking and then to intellectualization.

In the recent research (since 2013), new enabling technologies for intelligent manufacturing have been developed, including Internet of Things (IoT), Big Data, Digital Twin (DT), Cloud Manufacturing, and Cyber-Physical System (CPS), which endow the manufacturing process with intelligence. For instance, IoT devices can communicate and interact with each other, and thus enable the real-time monitoring and dynamic control. Big data analytics together with AI can help to mine out potential rules, knowledge and patterns, in order to smart prediction, evaluation, optimization and decision-making. DT aims at constructing interactive virtual mirrors for physical assets and fusing both real and simulated data to give more insights. Cloud Manufacturing transforms manufacturing resources and manufacturing capabilities into manufacturing services, which can be managed and operated in an intelligent and unified way to enable the full sharing and circulating of manufacturing resources and manufacturing capabilities. These technologies can be combined with each other and greatly promote the innovation of manufacturing in design, production, operation and maintenance, etc. The findings presented in this study reveal the technical developing tendency and current hot topics in intelligent manufacturing and will facilitate scholars’ investigation in the related fields, a comprehensive taxonomy of Intelligent Manufacturing can also be developed through analyzing the results of this review.

Industry 4.0, China Manufacturing 2025, intelligent manufacturing, research hotspots, VOSviewerdoi: [10.1360/N972019-00125](https://doi.org/10.1360/N972019-00125)